DESCRIPTION DE DIVERS MOUVEMENTS DE ROTATION :

1. LA CENTRIFUGEUSE

(mouvement de l'eau et du linge placé à l'intérieur)

2. LA BILLE QUI TOURNE AUTOUR D'UN AXE

(mouvement d'une bille suspendue par un fil et entraînée par un axe en rotation)

3. LA TERRE QUI TOURNE AUTOUR DU SOLEIL

1. LA CENTRIFUGEUSE

Tout le monde connaît le principe de la centrifugeuse qui trouve son application dans le lave-linge ou l'essoreuse de la maison. Centrifugeuse vient de centrifuge qui signifie ‘‘*qui éloigne du centre*’’. La centrifugeuse prouve-t-elle l'existence de la force centrifuge ? C'est ce que nous allons voir…

Un principe fondamental…

Un des principes fondamentaux de la physique (c'est la première loi de Newton, voir le dossier ADILCA ‘‘*Isaac Newton*’’) énonce que la trajectoire normale d'un corps en mouvement est de nature rectiligne.

Cette trajectoire naturelle ne peut être déviée que par une force transversale. La notion de force découle du principe précédent : une force désigne toute cause capable de dévier la trajectoire d'une masse. On distingue deux types de forces correspondant à cette définition : la force de gravitation qui agit à distance et la force de guidage qui agit par pression ou par contact.

Ces lois sont le fondement de la physique moderne, elles ont été découvertes et formulées par le physicien anglais Isaac Newton en 1666.

Comment fonctionne une centrifugeuse ?

Une centrifugeuse se compose d'un tambour, sorte de cylindre creux dont la surface est percée de trous destinés à laisser passer l'eau, et d'un moteur électrique. Une fois entraîné par le moteur électrique, le tambour est animé d'un mouvement de rotation.

Dans son mouvement de rotation, le tambour entraîne le linge mouillé placé à l'intérieur, l'obligeant ainsi à décrire une trajectoire circulaire.

Conformément à la loi de Newton, le linge en mouvement devrait adopter une trajectoire rectiligne. S'il décrit une trajectoire circulaire, c'est parce qu'il est soumis en permanence à la force de guidage que le tambour exerce par contact. Cette force est d'orientation centripète (voir le dossier ADILCA ‘‘*force centripète*’’).

Aucune force de nature centrifuge n'agit donc sur le linge, à quelque moment que ce soit.

L'évacuation de l'eau

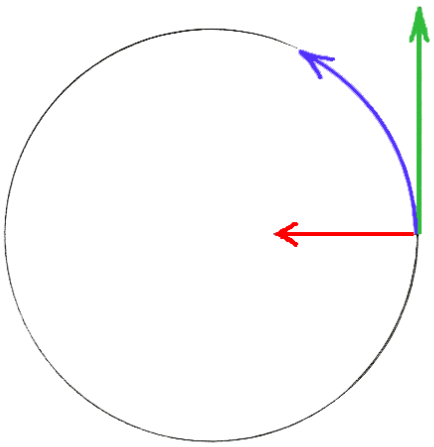
De quelle manière l'eau quitte-t-elle le tambour ?

Le linge, poreux par nature, ne peut communiquer une force de guidage suffisante aux molécules d'eau qui vont donc le traverser et se retrouver au contact du tambour. On a déjà dit que le tambour est un cylindre percé de trous. À la hauteur de ces trous, la force de guidage étant nulle, les molécules d'eau adoptent aussitôt une trajectoire rectiligne qui les mène à l'extérieur du tambour.

Cette trajectoire n'est pas radiale, c'est à dire dans le prolongement du rayon, mais bien tangente, c'est à dire perpendiculaire au rayon du tambour. Si l'eau quitte le tambour c'est donc par défaut de force de guidage et non pas à cause de la force centrifuge.

Pour être précis, la trajectoire des molécules d'eau livrées à elles-mêmes n'est parfaitement rectiligne qu'au moment où celles-ci quittent le tambour, cette trajectoire étant ensuite progressivement influencée par l'action combinée de deux forces : la force de gravitation et la résistance de l'air.

Aucune force de nature centrifuge n'agit donc sur les molécules d'eau à quelque moment que ce soit, pas plus à l'intérieur du tambour qu'à l'extérieur.



Principe de la centrifugeuse

Le linge mouillé décrit une trajectoire circulaire (flèche bleue) grâce à la force de guidage (flèche rouge) exercée par le tambour. L'eau quitte le tambour sur une trajectoire rectiligne tangente au rayon (flèche verte). Attention à ne pas additionner les vecteurs force et trajectoire !

Conclusion

En conclusion : la centrifugeuse existe, mais pas la force centrifuge !

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

2. LA BILLE QUI TOURNE AUTOUR D'UN AXE

Quelques ''pseudo-physiciens'' [(1)], sans doute soucieux de venir au secours du concept de force centrifuge, ont cru pouvoir prouver l'existence d'une force imaginaire en décrivant le mouvement de rotation d'une bille autour d'un axe ! Peine perdue !

Le recours abusif au concept de force centrifuge relève de la manipulation ou de l'incompétence. En effet, la force centrifuge étant une force imaginaire, on peut et on doit s'en passer, quelle que soit la nature du mouvement circulaire considéré : centrifugeuse, bille retenue par un fil, manège de fête foraine, voiture, planète, etc. Si on n'y arrive pas, c'est qu'il y a un ''loup'' quelque part ! À vous de le trouver !

Description du dispositif

Imaginons un dispositif composé d'un moteur entrainant un axe vertical avec, à l'extrémité de l'axe, un fil retenant une bille. Au repos, une seule force agit sur la bille, c'est son poids. La bille reste immobile car son poids est compensé par la tension du fil. Le système est donc en équilibre.

Le système en rotation

Mettons le moteur en marche. Dès que le système se met à tourner, la condition d'équilibre n'est plus respectée. Négligeons la phase d'accélération [(2)] et observons le dispositif lorsque la vitesse de rotation est stabilisée : la bille s'est éloignée de l'axe, elle décrit une trajectoire circulaire dans un plan horizontal, le fil qui la retient forme un angle par rapport à la verticale.

Les forces en présence

Selon le principe fondamental de la physique (première loi de Newton, voir le dossier ADILCA ''*Isaac Newton*''), la bille en mouvement devrait décrire une trajectoire rectiligne. Si elle ne le fait pas, c'est parce qu'elle est soumise en permanence à une force qui lui impose cette trajectoire circulaire.

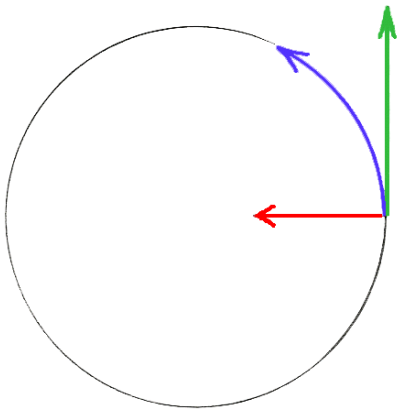
La force en question, c'est la force centripète ! Elle est ainsi nommée car elle est dirigée vers l'axe de rotation, elle s'exerce sur la bille par l'intermédiaire du fil [(3)].

Contrairement à une erreur largement répandue, le système n'est plus en équilibre, sinon comment expliquer le mouvement circulaire ?

En effet, à la différence de la situation observée au repos, l'équilibre est rompu puisqu'il y a désormais deux forces qui interviennent dans le système : l'une est verticale, c'est la force de sustentation de la bille, d'intensité égale et opposée à son poids ; l'autre

est horizontale, d'orientation centripète, elle maintient la bille en rotation. La tension du fil est égale à la résultante (autrement dit : à la somme vectorielle) de ces deux forces.

Cette description est complète ainsi ! Il n'y a pas besoin de rajouter quoi que ce soit, et surtout pas de force centrifuge (au secours !), il n'y en a pas besoin, et pour cause : la force centrifuge n'existe pas !



Bille qui tourne autour d'un axe (dispositif vu de dessus)

La bille décrit une trajectoire circulaire (flèche bleue) à cause de la force centripète (flèche rouge) délivrée par l'axe de rotation et transmise par le fil (l'axe et le fil n'apparaissent pas sur le dessin). Si cette force cessait brusquement d'agir, par exemple en cas de rupture du fil, la bille livrée à elle-même décrirait immédiatement une trajectoire rectiligne (flèche verte).

Calcul de la force centripète

Quelle relation doit-on utiliser pour calculer l'intensité de la force centripète ? Celle-ci, et uniquement celle-ci :

$$\mathbf{F = M\ V^2 / R}$$

Pour garantir la validité de la relation, la masse **M** de la bille doit s'exprimer en kilogrammes (symbole **kg**), sa vitesse **V** en mètres par seconde (symbole $\mathbf{m.s^{-1}}$) et le rayon **R** de sa trajectoire en mètres (symbole **m**).

Le résultat s'exprime en newtons (symbole **N**), l'unité internationale de force.

La cohérence des unités se vérifie ainsi :

$$\mathbf{F} = kg\ .\ (m.s^{-1})^2\ .\ m^{-1} = kg\ .\ m^2.s^{-2}\ .\ m^{-1} = kg\ .\ m.s^{-2} = \mathbf{N}$$

Le troisième principe de Newton

Le troisième principe de Newton énonce que toute force s'exerçant sur une masse entraîne une réaction d'égale intensité mais de sens opposé.

Comment ce principe, souvent mal compris, s'applique-t-il dans le cas du dispositif décrit ci-dessus ? De manière très simple et très logique : la bille en rotation exerce une traction sur le fil, et donc sur l'axe. L'intensité de cette traction est égale à la somme vectorielle du poids de la bille et de la force centripète (4).

Si la bille conserve son mouvement de rotation tandis que l'axe reste insensible à cette traction, c'est soit parce que le moteur forme une masse considérablement plus lourde que la bille, soit parce que le dispositif est solidement fixé à la Terre (5).

On conçoit d'ailleurs que, si tel n'était pas le cas, l'axe et son moteur seraient renversés par le mouvement de la bille.

Une description ''statique''

Imaginons maintenant le même dispositif avec cette fois un observateur placé sur l'axe et tournant en même temps que lui. L'observateur n'ayant alors plus aucune perception du mouvement de rotation, cela l'obligerait à raisonner en statique, autrement dit, à raisonner comme si la bille cessait de tourner…

Raisonnement tordu ? Hypothèse débile ? Pas du tout ! L'humanité a raisonné ainsi pendant des millénaires, jusqu'à l'avènement de Copernic, Galilée et Newton ! En effet, le raisonnement de l'époque consistait à décrire le mouvement du Soleil et des planètes du système solaire en partant du postulat que la Terre était immobile !

Le plus drôle, c'est que ce mode de raisonnement perdure encore aujourd'hui ! Pour faire sérieux, on l'a affublé de qualificatifs dont peu de scientifiques ont réellement compris le sens et la portée : on dit qu'on raisonne dans le cadre d'un référentiel relatif, non-inertiel ou non-galiléen… Etc. Bref, il suffit de préciser qu'on raisonne en statique, ça revient strictement au même !

Quant au mode d'emploi, ne le cherchez pas ailleurs ! Notre site est quasiment le seul à ce jour à distinguer soigneusement les descriptions, et en prenant grand soin de ne jamais les mélanger !

En effet, ce raisonnement est dit ''statique'', par opposition au raisonnement ''dynamique'' exposé plus haut. Quelles sont les limites de ce raisonnement ?

Le mouvement de rotation de la bille est désormais figé, comme si on l'observait à partir d'une photographie. Dès lors, comment expliquer l'angle que forme le fil avec la verticale ? C'est là qu'intervient la force centrifuge, la mal nommée !

En effet, pour maintenir la bille en équilibre et expliquer l'angle que forme le fil avec la verticale, il faut imaginer une force fictive s'exerçant horizontalement sur le centre de gravité de la bille, mais orientée à l'opposé de l'axe ! Cette force, c'est la force centrifuge ! La mal nommée puisqu'il n'y a plus de trajectoire circulaire, donc plus de centre, le mouvement de rotation de la bille ayant disparu aux yeux de l'observateur !

Ajoutons qu'ici, le troisième principe de Newton est rigoureusement inapplicable puisqu'il n'y a pas d'interaction, la force centrifuge étant une force imaginaire.

Calcul de la force centrifuge

Quelle relation doit-on utiliser pour calculer l'intensité de la force centrifuge ? Celle-ci, et uniquement celle-ci :

$$\mathbf{F' = - M\ g}\ \text{tangente}\ \alpha$$

Le signe [**–**] permet de préciser l'orientation spatiale de cette force. Pour garantir la validité de la relation, la masse **M** de la bille doit s'exprimer en kilogrammes (symbole **kg**), l'accélération gravitationnelle **g** en mètres par seconde carrée (symbole $\mathbf{m.s^{-2}}$) et l'angle α d'inclinaison du fil par rapport à la verticale, indifféremment en degrés ou en radians (les valeurs trigonométriques n'ont pas de dimension).

Le résultat s'exprime en newtons (symbole **N**) qui est l'unité internationale de force.

La cohérence des unités se vérifie ainsi :

$$\mathbf{F'} = \text{kg . m.s}^{-2} = \mathbf{N}$$

Égalité = danger !

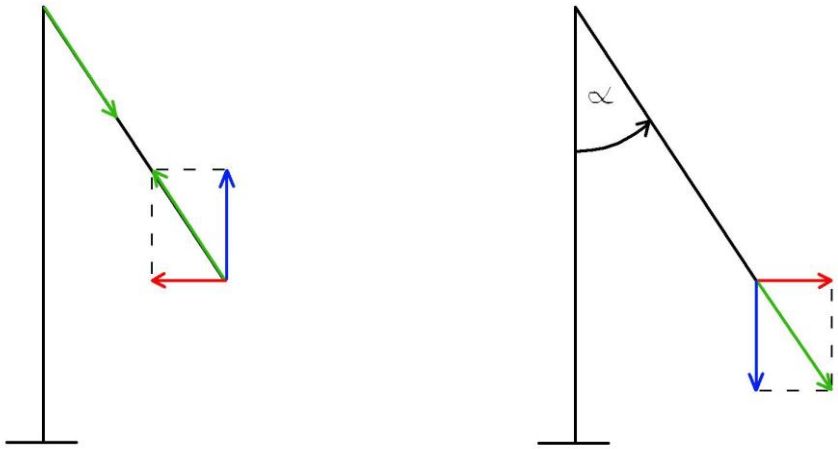
Une application numérique de ces deux relations donnerait un résultat surprenant : toutes conditions égales par ailleurs, on constaterait que la force centripète en dynamique et la force centrifuge en statique ont rigoureusement la même intensité !

Cependant, il ne faut rien en conclure de plus, ces deux forces n'appartenant pas à la même description ! La pire des fautes serait de les confondre ou de les mélanger !

En effet, tout les distingue, tout les oppose : l'une de ces deux forces s'exerce par contact direct du fil sur une bille en mouvement, l'autre s'exerce comme par miracle sur le centre de gravité d'une bille immobile ; l'une de ces deux forces est le résultat d'une interaction, de l'axe sur le fil et du fil sur la bille, l'autre non ; l'une de ces deux forces est d'orientation centripète, l'autre est d'orientation centrifuge. D'ailleurs, pour éviter toute confusion, une bonne précaution consiste à affubler la force centrifuge d'un signe négatif afin de préciser sa direction, contraire à la logique du mouvement.

Deux dessins pour bien comprendre…

Les deux descriptions précédentes ne devant être ni confondues, ni mélangées, il est impératif de les distinguer par deux dessins séparés, comme ceux-ci :



Premier dessin : c'est la *description dynamique* de la rotation d'une bille autour d'un axe, en vue horizontale.

- la flèche bleue représente la force de sustentation, cette force qui maintient la bille en équilibre vertical ;

- la flèche rouge représente la force centripète, cette force qui maintient la bille sur une trajectoire circulaire ;

- il y a deux flèches vertes : l'une représente la résultante des deux forces précédemment citées, elle s'exerce sur la bille par l'intermédiaire du fil ; l'autre représente la réaction à cette résultante, elle s'exerce sur l'axe de rotation par l'intermédiaire du fil.

Deuxième dessin : c'est la *description statique* du phénomène, autrement dit : l'axe ne tourne pas, la bille est immobile dans l'espace, comme par magie, le fil formant un angle par rapport à la verticale.

- la flèche bleue représente le poids de la bille ;

- la flèche rouge représente la force centrifuge ;

- la flèche verte représente la résultante de ces deux forces.

Conclusion

En conclusion, égalité = danger !

Méfiez-vous des calculs aux résultats identiques, ils n'autorisent pas pour autant l'interchangeabilité des concepts et des raisonnements !

Suivez donc ces conseils : toujours distinguer la nature, le point d'application et l'orientation des différentes forces étudiées, ainsi que les réactions associées ; ne jamais mélanger les descriptions ; ne jamais associer une force réelle et une force imaginaire !

Par ailleurs, n'hésitez pas à remettre en question les certitudes, les démonstrations ou les dessins de vos professeurs, aussi sympathiques, diplômés et compétents soient-ils ! Des recherches ont en effet démontré que les meilleurs d'entre eux ont pu involontairement induire en erreur des générations de lycéens et étudiants (voir le dossier ADILCA ''*Cessac & Tréherne*'').

(1) *"Pseudos-physiciens" : ainsi nomme-t-on, par dérision, ceux s'obstinent à ne considérer que les forces imaginaires, dites aussi forces fictives ou pseudo-forces, en ignorant les autres.*

(2) *Durant la phase d'accélération, le travail du moteur consiste à communiquer une énergie cinétique correspondant à la vitesse acquise par la bille (on néglige la masse du fil et la résistance de l'air), à laquelle il faut ajouter l'énergie gravitationnelle correspondant à la différence de hauteur entre la position de la bille au repos et sa position une fois la vitesse de rotation stabilisée.*

(3) *Cette force est ici qualifiée de centripète par souci de simplification, mais il s'agit en réalité d'une force de guidage : en effet, le fil ne rapproche jamais la bille de l'axe de rotation, il se contente de la dévier d'une trajectoire rectiligne pour lui imposer une trajectoire circulaire (voir le dossier ADILCA "force centripète").*

(4) *Ici, on néglige la masse du fil ; cependant, dans le cas d'un manège de fête foraine, il faudrait évidemment prendre en compte la masse du bras porteur.*

(5) *Ce qui revient à dire qu'en dernière analyse, les forces réelles sont toutes le résultat d'une interaction avec la Terre.*

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

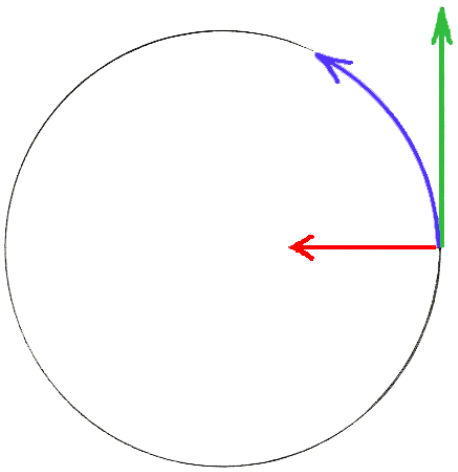
*** * ***

3. LA TERRE QUI TOURNE AUTOUR DU SOLEIL

Les lois de la physique sont celles de l'Univers, ce sont donc des lois *universelles* : elles s'appliquent de la même façon à la centrifugeuse, à la bille qui tourne autour d'un axe, à la trajectoire d'une voiture, à l'équilibre du système solaire ou à n'importe quel autre phénomène, c'est là tout le génie d'Isaac Newton de l'avoir découvert.

Appliquons ces lois à l'étude du mouvement de la Terre. Notre planète tourne autour du Soleil à la vitesse de 30 kilomètres par seconde sur une trajectoire circulaire de 150 millions de kilomètres de rayon.

Comment expliquer cette trajectoire ? Elle est due à la force de gravitation créée par la masse du Soleil. Cette mystérieuse force (dite aussi *force centripète*) agit à distance, elle est de la même nature que celle qui, sur Terre, fait tomber les objets au sol.



Représentation schématique du mouvement de la Terre

La Terre décrit une trajectoire circulaire (flèche bleue) à cause de la force de gravitation (flèche rouge) qui l'attire vers le Soleil. Si cette force n'existait pas, la Terre adopterait une trajectoire rectiligne (flèche verte).

Modifier les lois de l'Univers…

Imaginons que les lois de l'Univers soient complètement modifiées. Que se passerait-il si la Terre avait une vitesse nulle ou cessait brusquement d'obéir à l'attraction du Soleil ?

- dépourvue de vitesse mais soumise à la force de gravitation, la Terre prendrait immédiatement la direction du Soleil pour venir s'y fondre.

- insensible à la gravitation mais conservant sa vitesse, la Terre adopterait immédiatement une trajectoire rectiligne et s'éloignerait du Soleil.

Insistons sur ce point : si la Terre s'éloignait du Soleil, ce serait bien par défaut de force de gravitation et non à cause d'une quelconque force centrifuge.

Le troisième principe de Newton

Le troisième principe de Newton énonce que toute force s'exerçant sur une masse entraîne une réaction d'égale intensité mais de sens opposé.

Ce principe s'applique-t-il dans le cas du système solaire ? Bien sûr que oui ! Le Soleil attire la Terre, donc la Terre attire également le Soleil, avec une force de même intensité mais de sens opposé ! Cette force s'exerce au centre du Soleil, elle est orientée vers le centre de la Terre.

Pourquoi la Terre seule infléchit-elle sa trajectoire, le Soleil restant parfaitement immobile ? C'est une question de rapport de force entre deux corps de masses inégales, le Soleil étant 333 333 fois plus massique que la Terre (*).

Conclusion

En conclusion : le concept de force centrifuge n'est pas plus nécessaire dans cette description-ci que dans toutes les autres !

(*) *Masse du Soleil (S) : 2 x 10^{30} kg ; masse de la Terre (T) : 6 x 10^{24} kg ; rapport S/T : 0,33 x 10^{6}.*

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

*** * ***